



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AJUSTE DOS MAPAS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES AXIAIS PELO MÉTODO DAS ELIPSES

Alexandre Azevedo Samel

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador(es): Ulisses Admar Barbosa Vicente
Monteiro

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2014

AJUSTE DOS MAPAS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES AXIAIS PELO
MÉTODO DAS ELIPSES

Alexandre Azevedo Samel

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO NAVAL E OCEÂNICO.

Examinado por:

Ulisses Admar Monteiro, D.Sc., DENO/UFRJ
(Orientador)

Severino Fonseca da Silva Neto, D.Sc., DENO/COPPE/UFRJ

Eng. Ricardo Homero Ramírez Gutiérrez, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2014

Samel, Alexandre Azevedo

Ajuste dos Mapas de Desempenho de Compressores Axiais pelo Método das Elipses / Alexandre Azevedo Samel. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

VII, 41 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ulisses Admar Barbosa Vicente Monteiro

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Naval e Oceânica, 2014

Referências Bibliográficas: p. 23.

1. Mapas de Desempenho Genéricos. 2. Compressores. 3. Parâmetros de Desempenho. I. Barbosa Vicente Monteiro, Ulisses Admar. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica. III. Desenvolvimento de um Modelo Termodinâmico de Compressores Axiais baseado em Mapas de Desempenho Genéricos.

DEDICATÓRIA

Essa é mais uma vitória que não se concretizaria sem o esforço e dedicação de uma família que sempre me apoiou em todos os momentos da minha vida e sempre foram os pilares da minha criação. Ao meu pai, Ivanilson Calor Samel, que sempre me ajudou e sempre fez o possível para que os meus sonhos se concretizassem. A minha mãe, Andreia Azevedo, um agradecimento mais que especial, foi quem tornou todas minhas conquistas possíveis, quem dedicou todos os momentos e se sacrificou o máximo para tornar essa empreitada até aqui o menos árduo possível. Obrigado por tudo, por todo o tempo dedicado.

Aos meus Avós Joel Azevedo e Malvina Maria Luiza Azevedo, que contribuíram para a minha formação sempre com palavras de carinho e atenção.

Dedico especialmente a Tais Paiva Pinheiro, que me ajudou a trilhar esse caminho principalmente nos últimos anos de faculdade, me ensinou muito não só dentro da universidade em inúmeras matérias mas na vida em si com muito carinho, atenção e amor, se mostrou sempre solícita estando ao meu lado nos acertos e nos erros e me conquistando a cada dia mais. Obrigado por ter sido tão companheira e amorosa nesse tempo juntos, nunca te esquecerei, você estará sempre em meu coração.

A todos os meus amigos, que entenderam toda a dificuldade e tempo gasto nos projetos acadêmicos, e nunca deixaram de me ligar e tenho certeza que nunca deixaram de fazer parte da história da minha vida.

A meu grande amigo e dupla de Projeto Fernando Augusto que se mostrou um cara sensacional, um amigo pra qualquer hora sempre disposto a ajudar, me sinto privilegiado de tê-lo como amigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu grande mestre e amigo Ulisses Admar Barbosa Vicente Monteiro, que fez o possível para que este projeto ficasse pronto e para que eu pudesse me tornar um engenheiro. Pela paciência em ensinar e pela dedicação comigo. Obrigado meu caro mestre.

Agradeço ao mestre Severino Fonseca que sempre se dispôs a ajudar e conversar comigo nas outras oportunas. Obrigado pela orientações e ensinamentos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval e Oceânico.

Ajuste dos Mapas de Desempenho de Compressores Axiais pelo Método das Elipses

Alexandre Azevedo Samel

Fevereiro/2014

Orientador: Ulisses Admar Barbosa Vicente Monteiro

Curso: Engenharia Naval e Oceânica

O Objetivo deste trabalho é utilizar equações elípticas para representar os mapas de desempenho de compressores que estão na forma tabular. Para isso, são utilizados como parâmetros nas equações os fatores de escala de razão de pressão, vazão mássica, rotação e eficiência.

Palavras-chave: Mapas de Desempenho Genéricos, Compressores, Parâmetros de Desempenho.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Adjustment of Axials Compressor Performance Maps by Ellipses Method

Alexandre Azevedo Samel

February/2014

Advisor: Ulisses Admar Barbosa Vicente Monteiro

Course: Ocean Engineering

The goal of this work is to use elliptic equations to represent the performance maps of compressors that are in tabular form. To do so, are used as parameters in the equations the scaling factors of pressure ratio, mass flow rate, rotation and efficiency.

Keywords: Generic Performance Maps, Compressors, Performance Parameters.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	viii
1- INTRODUÇÃO	1
1.1- Objetivo do Projeto Final	1
2- PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	2
2.1- Compressores Axiais.....	2
2.2- Análise Dimensional	3
2.3- Teoria dos Compressores	5
2.3.1- Teoria Básica.....	5
2.3.2- Velocidade nas pás	6
2.3.3- Número de Mach.....	6
2.3.4- Fatores de Bloqueio.....	6
2.4- Simulação do Desempenho do compressor.....	7
3- CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA ELIPSE	12
3.1- Vazão de ar versus Razão de pressão	14
3.2- Razão de pressão versus Eficiência.....	16
3.3- Solução para qualquer rotação	20
5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	23
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
7- ANEXOS.....	25
Anexo A.....	25
Anexo B.....	27

1- INTRODUÇÃO

O projeto abordará o desenvolvimento de um modelo termodinâmica de compressores axiais baseado em Mapas de Desempenho Genéricos. Serão utilizados parâmetros para representar equações elípticas que traduzirão os mapas de desempenho. Para isso os parâmetros devem ser os fatores de escala de razão de pressão, vazão mássica, rotação e eficiência.

1.1- Objetivo do Projeto Final

O objetivo deste projeto é mostrar que a substituição das curvas dos mapas dos compressores por elipses é uma maneira simples e muito eficaz de se verificar algum erro ou problema no funcionamento do equipamento. Através de mapas semi adimensionais, que podem ser usados para uma série de compressores por serem adimensionalizados pela temperatura e pressão, pode-se verificar se o compressor está executando a sua tarefa com eficiência máxima possível.

2- PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

2.1- Compressores Axiais

Os compressores axiais são máquinas de fluxo nas quais a compressão é obtida por aceleração axial do fluido. A mais simples é a compressão de ar, seja para acionamento e controle de válvulas, alimentação de motores ou turbinas a gás, até aplicações mais complexas, como o transporte de gás natural, injeção de CO₂ em reservatórios subterrâneos, ou compressão de hidrocarbonetos em ciclos de refrigeração.

Os compressores axiais são compostos por 2 componentes principais, o impelidor e o difusor. O impelidor é um elemento rotativo composto por pás fixadas ao eixo que gira a uma alta velocidade e tem a função de impelir o gás através de uma série de estágios de compressão. Cada par de impelidor e difusores compõe um estágio de compressão, quanto maior o número de estágios, mais alta será a taxa de compressão. O impelidor transfere para o gás a energia recebida de um componente externo (no caso de turbinas a gás é a própria turbina montada no mesmo eixo do compressor) acarretando em ganhos de velocidade e entalpia do escoamento. Ao chegar em alta velocidade os difusores transformam essa alta velocidade do escoamento em pressão.

Alguns dos principais fabricantes de compressores se encontram na tabela a seguir.






Man Turbomaschinen AG	
Druckluft 2000 Franc Mirt e.K.	
AviComp Controls GmbH	
LEISTRITZ Aktiengesellschaft	
FIMA Maschinenbau GmbH & Co. KG	
K2 Edelstahl - technik & Metallbau Berlin	

Figura 1 - Principais fabricantes de compressores

2.2- Análise Dimensional

A análise dimensional é uma ferramenta de grande valia na elaboração de teorias que se proponham interpretar resultados experimentais. Ela fornece informações precisas sobre combinações dos parâmetros envolvidos, de modo a reduzir o numero total de variáveis a incluir nas equações.

Em um sistema de unidade de medidas as unidades de um pequeno numero de grandezas são independentes e adotadas como unidades fundamentais. As grandezas fundamentais são aquelas cuja conceituação independe de outras grandezas. É o caso das três grandezas mecânicas comprimento, massa e tempo. Para a análise dimensional são atribuídos símbolos a essas três grandezas:

comprimento: L

Tempo: T

Massa: M

Além das grandezas mecânicas, há duas outras grandezas fundamentais, são a temperatura e a intensidade de corrente elétrica.

Temperatura: θ

Corrente Elétrica: I

Todas as outras grandezas físicas podem se expressas como combinações de potências dessas grandezas fundamentais. Por isso, são chamadas de grandezas derivadas.

O teorema π de Buckingham estabelece que, dada uma relação entre n parâmetros, então os n parâmetros podem ser agrupados em n-k razões independentes adimensionais (parâmetros π) construídas a partir das variáveis originais, onde o número k é igual ao número de dimensões primárias necessárias para especificar as unidades de todos os parâmetros envolvidos.

Quando se trata de desempenho de compressores, uma análise dimensional pode ser feita no intuito de determinar os parâmetros do qual dependem. O desempenho de um compressor depende das seguintes variáveis:

Variável	Descrição	Dimensão
T_{01}	Temperatura de estagnação de entrada	θ
p_{01}	Pressão de estagnação de entrada	$ML^{-1}t^{-2}$
C_p	Calor específico do gás a pressão constante	$L^2t^{-2}\theta^{-1}$
D	Dimensão característica (geralmente diâmetro)	L
N	Rotação do rotor	t^{-1}
\dot{m}	Vazão mássica do gás	Mt^{-1}
p_{02}	Pressão de estagnação de saída	$ML^{-1}t^{-2}$
T_{02}	Temperatura de estagnação na saída	θ
μ	Viscosidade absoluta do gás	$ML^{-1}t^{-1}$
ρ	Densidade do gás na entrada	ML^{-3}

Quando aplicamos o teorema de Buckingham aos parâmetros, obtém-se 6 parâmetros adimensionais:

Variável	Parâmetro adimensional
N	$\Pi_1 = \frac{ND}{\sqrt{C_p T_{01}}}$
\dot{m}	$\Pi_2 = \frac{\dot{m}\sqrt{C_p T_{01}}}{p_{01}D^2}$
p_{02}	$\Pi_3 = \frac{p_{02}}{p_{01}}$
T_{02}	$\Pi_4 = \frac{T_{02r}}{T_{01}}$
μ	$\Pi_5 = \frac{\mu\sqrt{C_p T_{01}}}{p_{01}D}$
ρ_1	$\Pi_6 = \frac{C_p \rho_1 T_{01}}{p_{01}}$

Cada um dos termos adimensionais podem ser relacionados com diversos parâmetros termodinâmicos, como segue na tabela abaixo:

Π_1	Número de <i>Mach</i> na extremidade do rotor, porque D é o diâmetro do rotor e o termo $\sqrt{C_p T_{01}}$ é proporcional à velocidade sônica.
Π_2	Vazão mássica – função do número de <i>Mach</i> do fluxo na entrada do compressor.
Π_3	Razão de pressão total do compressor.
Π_4	Variação de temperatura real do compressor.
Π_5	Número de Reynolds.
Π_6	Calor específico dividido pela constante dos gases (C_p/R) – define que o gás está sendo comprimido.

2.3- Teoria dos Compressores

2.3.1- Teoria Básica

Os compressores de fluxo axial consistem em uma série de estágios, cada estágio é composto por uma sequência de rotores com lâminas seguida de uma sequência de lâminas estatoras. O fluido de operação é inicialmente acelerado pelo rotor e desacelerado na passagem pelo estator onde a energia cinética transferida no rotor é convertida em pressão estática. O processo é repetido em quantos estágios forem necessários para que a razão de pressão requerida seja alcançada.

O fluxo está sempre sujeito a um gradiente de pressão adverso, e quanto maior a razão de pressão mais difícil se torna o projeto do compressor. É necessário um projeto extremamente cuidadoso nas lâminas dos compressores levando em conta teorias aerodinâmicas e experimentos, não só para evitar perdas desnecessárias, mas também para garantir uma minimização nos problemas relacionados ao stall, que são predominantes nos compressores axiais, especialmente quando a razão de compressão é alta.

O fato do gradiente de pressão estar agindo contra o fluxo é sempre perigoso para a estabilidade do mesmo, e fluxo reverso pode facilmente ocorrer em condições de grande fluxo e velocidade rotacional, para as quais as lâminas não são projetadas.

Normalmente o fluido de trabalho do compressor axial é o ar, mas em alguns casos hélio e dióxido de carbono podem ser usados.

Assume-se que o processo é adiabático e a potência é absorvida pelo rotor e o estator transforma a energia cinética oriunda da alta velocidade do fluido em um aumento de pressão estática, mantendo a temperatura constante. Devido a fricção do fluido, tanto no rotor quanto no estator, há uma perda no ganho de pressão. O ganho de pressão neste processo é menor que o ganho obtido se o processo fosse por compressão isentrópica para uma mesma potência instalada.

Para obter um alto crescimento da temperatura em cada estágio, que é desejável pois minimiza-se o número de estágios para se obter uma dada razão de pressão, deve-se combinar alta velocidade de rotação das pás, alta velocidade axial e alta deflexão do fluido nas pás do rotor.

2.3.2- Velocidade nas pás

A força centrífuga nas pás do rotor depende da velocidade de rotação, do material e do comprimento das pás. A tensão gerada por essa força é proporcional ao quadrado da velocidade na ponta da pá, ou seja, quando essa velocidade de rotação na ponta da pá é muito alta, a tensão presente cresce quadraticamente. A tensão na pá vai limitar a velocidade na ponta da mesma.

Essas tensões não são normalmente a maior preocupação nas pás do compressor. O primeiro estágio de pás, sendo o mais longo, possui uma alta tensão, porém com o passar dos estágios essa tensão tende a ser moderada. As pás estão sujeitas a tensões oscilatórias que podem causar falhar por fadiga.

2.3.3- Número de Mach

É definida como a relação entre a velocidade do objeto e a velocidade do som, a velocidade Mach é quantas vezes o corpo atingiu a velocidade do som na determinada temperatura.

A velocidade do som varia com a temperatura, então as condições do local são extremamente importantes para o cálculo do número de Mach.

Pode-se dividir a velocidade de Mach em 5 tipos:

Subsônica: $Ma < 1$

Transônica: $0.8 < Ma < 1.2$

Sônica: $Ma = 1$

Supersônica: Entre 1.2 Ma e 5 Ma

Hipersônica: $Ma > 5$

2.3.4- Fatores de Bloqueio

Devido ao gradiente de pressão adverso nos compressores, a camada limite ao longo das paredes do anel tendem a engrossar enquanto o fluxo progride no compressor. O efeito principal é reduzir a área disponível para o fluxo para abaixo da área geométrica do anel. Isso irá gerar um efeito considerável na velocidade axial através do. O fluxo é extremamente complexo, com sucessivas acelerações e desacelerações

combinadas com mudanças na direção tangencial do fluxo; os efeitos causados pela folga entre a ponta da pá e a estrutura do compressor também são significantes, fazendo o cálculo da camada limite crescer com extrema dificuldade. Por isso, normalmente usa-se fatores de correção empíricos baseados em experimentos feitos com compressores.

Os primeiros experimentos relativos ao aumento da temperatura no estágio revelaram que os valores obtidos experimentalmente eram sempre menores do que os obtidos pela equação teórica. A explicação para isso foi de que a distribuição radial da velocidade axial não era constante ao longo do anel, mas crescia até atingir um pico depois diminuindo até que se estabilizava próximo do quarto estágio.

Uma solução é utilizar fatores de bloqueio para reduzir a área efetiva do anel, fazendo com que a espessura da camada limite cresça. Esse fator é uma correção empírica baseada na experiência de projetistas.

2.4- Simulação do Desempenho do compressor

Conforme o equipamento vai ser utilizado, alguns problemas começam a aparecer. Esses problemas resultam na perda de eficiência do equipamento, fazendo com que o mesmo não tenha mais o mesmo desempenho.

Uma das causas mais comuns de falhas é o acúmulo de material nas superfícies das lâminas, que causam um aumento na rugosidade, muda a forma da palheta e por consequência altera o ângulo de entrada e diminui a abertura da passagem.



Figura 2 - Acúmulo de material

Esse depósito resulta numa redução do fluxo de massa e da razão de pressão na saída do compressor, resultando numa perda de eficiência do mesmo. Para solucionar o problema uma simples limpeza do compressor pode ser suficiente.

Um outro problema que ocorre nos compressores é a erosão. Neste caso ocorre uma remoção do material que torna a superfície mais rugosa, um aumento das folgas, uma variação na distribuição de pressão nas palhetas e por consequência uma queda na eficiência e do fluxo de massa.

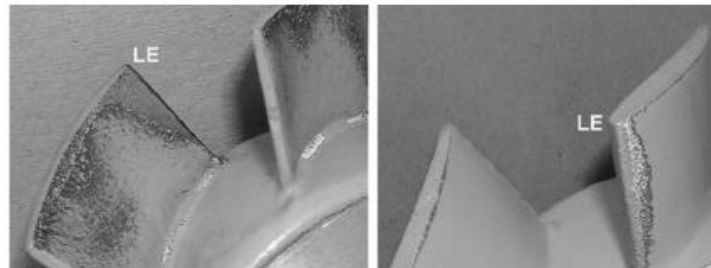


Figura 3 - Erosão na palheta

A corrosão das palhetas é similar a erosão, visto que há perda de material das palhetas.



Figura 4 - Corrosão na palheta

Existem várias outras falhas e defeitos que afetam o compressor reduzindo a eficiência do mesmo, e a intenção deste trabalho é mostrar uma maneira de verificar se o compressor opera em perfeitas condições ou se apresenta alguma dessas falhas.

Uma maneira de verificar se o compressor apresenta algum defeito é utilizar os mapas de desempenho do compressor para essa análise, uma vez que tendo dois dos quatro parâmetros, é possível obter os demais.

Ao pegar os parâmetros reais e traçá-los no mapa do compressor pode-se verificar se a máquina está operando corretamente ou não e então decidir para o equipamento para o conserto do mesmo.

Essa leitura se faz muito importante, uma vez que parar o equipamento para uma manutenção pode ter um custo muito alto dependendo da operação em que está submetido.

Para que o tempo de parada do equipamento seja o menor possível uma solução muito simples pode ser aplicada, a transformação das curvas do mapa em elipses. Essas elipses facilitam a leitura pois trata-se de uma equação simples e conhecida, além de garantir uma confiabilidade grande com baixa porcentagem de erro.

O desempenho de um compressor pode ser apresentado em um mapa, conhecido como mapa do compressor. Esse mapa pode ser usado para uma série de compressores. Os parâmetros que compõe o mapa são:

- razão de compressão;
- vazão em massa semi adimensional corrigida ;
- rotação semi adimensional corrigida ;
- eficiência isentrópica de compressão .

1. Razão de Compressão:

$$\text{Razão de Compressão} = p_{02}/p_{01}$$

onde p_{02} é a pressão na saída do compressor e p_{01} na entrada do compressor.

2. Vazão em massa Semi Adimensional Corrigida:

$$\text{Fluxo de massa} = \dot{m}\sqrt{\theta_{01}}/\delta_{01}$$

onde \dot{m} é o fluxo de massa, θ_{01} é a razão entre a temperatura na entrada no compressor e a temperatura de referência e δ_{01} é a razão entre a pressão de entrada do compressor e a pressão de referência.

3. Rotação Semi Adimensional Corrigida:

$$\text{Rotação} = N/\sqrt{\theta_{01}}$$

onde N é a razão entre a rotação atual e a rotação máxima e θ_{01} é a razão entre a temperatura na entrada no compressor e a temperatura de referência.

4. Eficiência Isentrópica de Compressão:

$$Eficiência = \eta_c$$

Os compressores tem sua capacidade e eficiência diretamente afetados pelo ambiente externo, ou seja, pelas condições de temperatura e pressão. Um compressor operando em uma região fria por exemplo possui uma eficiência muito maior do que este mesmo compressor operando em uma região tropical.

Para que se tenha os compressores operando em qualquer condição podendo utilizar o mesmo mapa de desempenho é necessário que os parâmetros sejam adimensionalizados para uma temperatura e pressão de referência. Normalmente essa temperatura é de 15°C.

O comportamento do compressor é limitado pela "surge line" e é determinado pelas curvas de razão de pressão e eficiência em função da vazão em massa para diversos valores de rotação como mostra a figura a seguir.

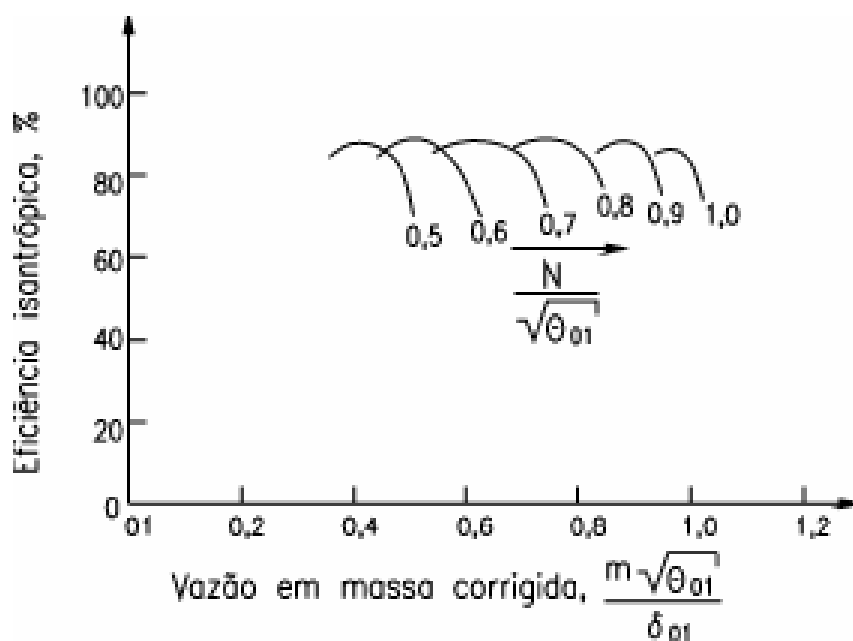


Figura 5 - Eficiência X Fluxo de Massa

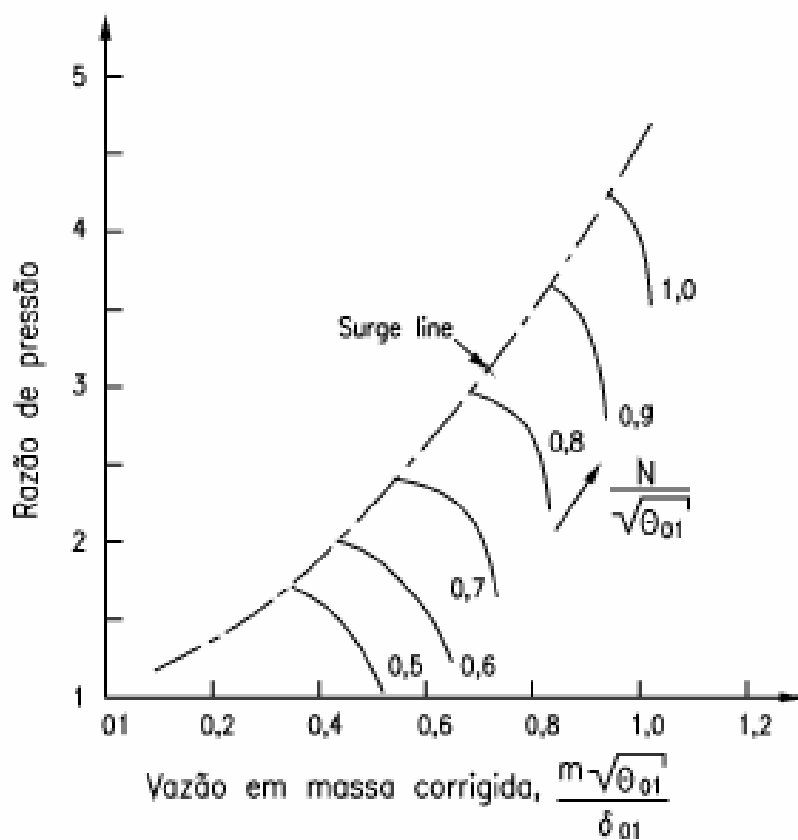


Figura 6 - Razão de Pressão X Fluxo de Massa

Esse mapa pode ser utilizado por uma série de compressores e cada linha representa uma rotação.

3- CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA ELIPSE

O mapa de desempenho do compressor tem curvas semelhantes a uma elipse (no primeiro quadrante). O mapa genérico usado possui valores obtidos experimentalmente e a intenção é transformar esse mapa em elipses (uma para cada rotação) facilitando a obtenção dos parâmetros de desempenho do compressor em qualquer ponto de operação.

A equação da elipse é dada pela Eq. (2.1):

$$\left(\frac{x}{a}\right)^z + \left(\frac{y}{b}\right)^z = c \quad (2.1)$$

Os valores de a e b são constantes e representam os raios máximos no eixo x e y respectivamente.

Os valores de c e z podem ser modificados com o intuito de aproximar a equação da elipse para a curva real do compressor.

É válido mencionar que a equação da elipse é fixada com $z=2$, como o z neste caso é variável o nome "Equação da Elipse" é uma maneira didática de explicitar a fórmula, porém a equação não constitui uma equação normal de elipse.

Para explicar melhor como isso é possível foram traçados dois gráficos variando os parâmetros c e z para demonstrar como a equação da elipse se comporta. Os valores de a e b foram tomados igual a 7 e 6 respectivamente para ambos os gráficos. O parâmetro z foi variado em 2, 5 e 7 e o parâmetro c foi variado em 1, 4 e 9.

O parâmetro z varia conforme mostrado na Figura 7.

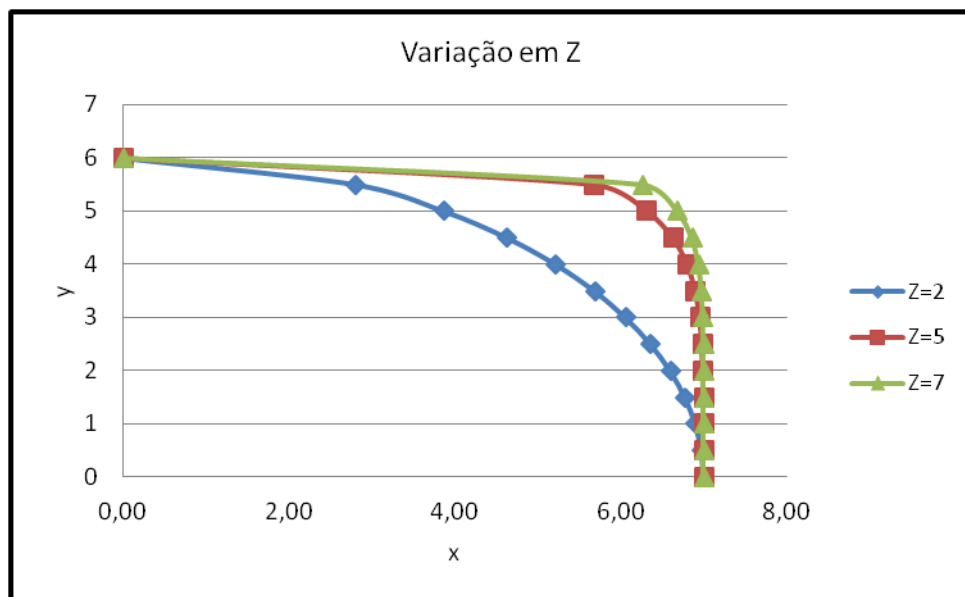


Figura 7 - Modificação do parâmetro z

O parâmetro c varia conforme mostrado na Figura 8.

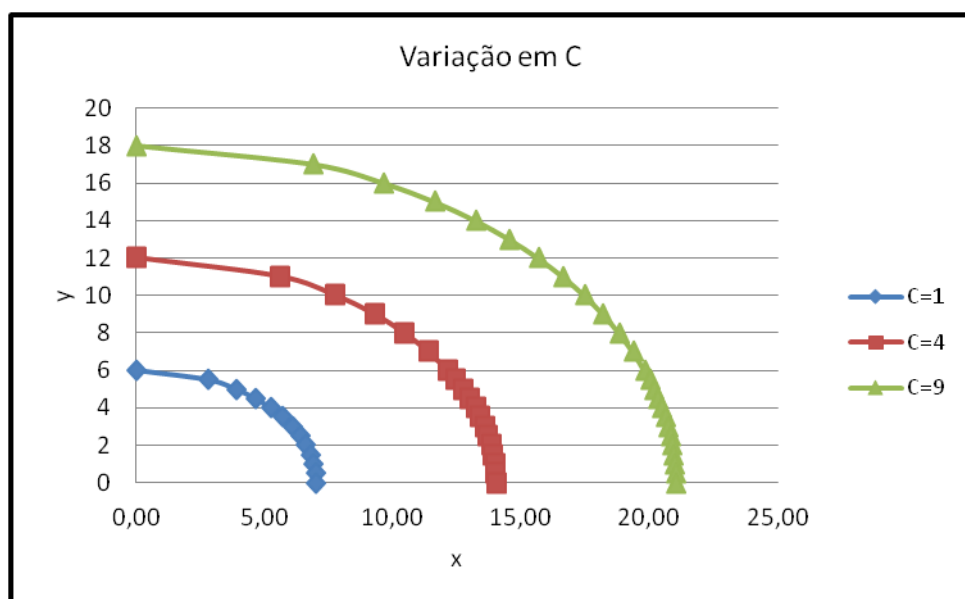


Figura 8 - Modificação no parâmetro c

3.1- Vazão de ar versus Razão de pressão

Como dito anteriormente, a vazão de ar (vazão em massa semi adimensional corrigida) e a razão de pressão (razão de compressão) compõe um mapa de desempenho onde no eixo y tem-se a vazão de ar e no eixo x a razão de pressão. Os dados foram obtidos experimentalmente e o mapa pode ser visualizado na figura 9.

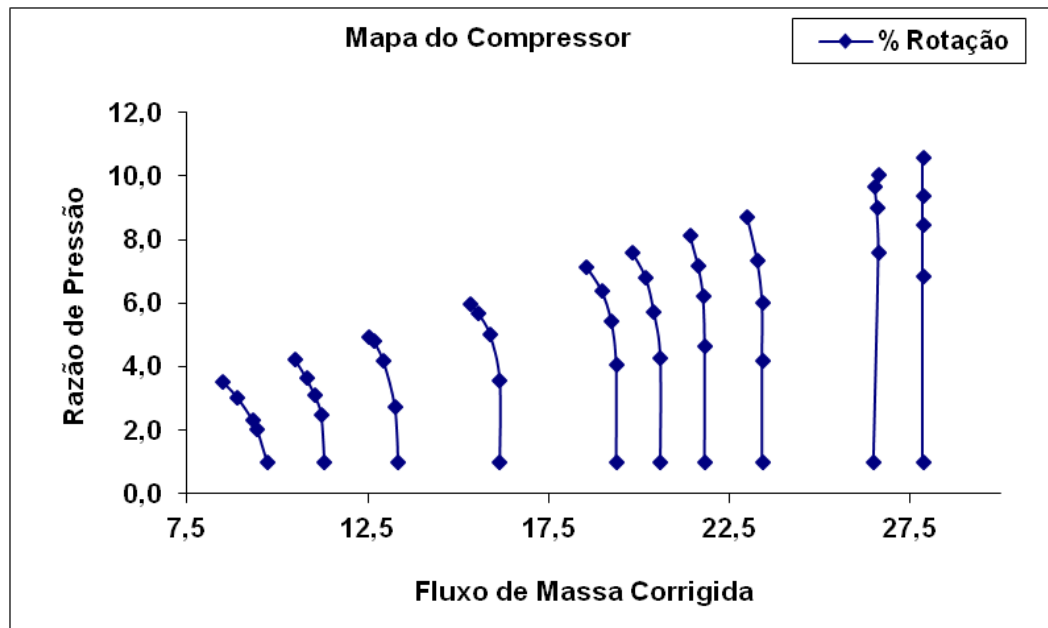


Figura 9 - Mapa Razão de Pressão por Fluxo de Massa

As curvas representam as diversas rotações (0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.89, 0.92, 0.95, 1.00, 1.10 e 1.15).

Para que as curvas da elipse representem as curvas reais do compressor, deve-se assumir alguns valores para serem aplicadas na equação 2.1.

a= valor da vazão para a menor razão de pressão;

c= variável de ajuste;

z= variável de ajuste;

x= vazão de ar na *surge line*;

y= razão de pressão na *surge line*;

Aplicando esses valores na Eq.(2.1) obtém-se o valor do parâmetro b:

$$b = \left(\frac{y^z}{c - \left(\frac{x}{a}\right)^z} \right)^{\frac{1}{z}} \quad 2.2$$

As variáveis de ajuste (c e z) serão modificadas no intuito de aproximar cada vez mais da curva real do compressor. Tendo os valores de a e b calculados e os valores de y (razão de pressão) também já existentes no mapa dos compressores, volta-se a equação 2.1 para obter-se o valor de x e traçar a elipse.

$$x = a \times \left(c - \left(\frac{y}{b} \right)^z \right)^{\frac{1}{z}} \quad 2.3$$

Como exemplo, será mostrado o cálculo e a curva de rotação (rotação semi adimensional corrigida) 0.5 traçada pela equação da elipse (segundo o processo detalhado anteriormente), juntamente com a curva real do compressor.

Tabela 1 - cálculo dos parâmetros

PCN	a	x	y	c	z	b	X	ERRO
0,50000	9,70688	8,48218	1,00000	1,020	2,260	6,179	9,723	0,163%
0,50000	9,70688	8,48218	2,01800	1,020	2,260		9,446	0,118%
0,50000	9,70688	8,48218	2,33500	1,020	2,260		9,306	0,080%
0,50000	9,70688	8,48218	3,02400	1,020	2,260		8,896	0,063%
0,50000	9,70688	8,48218	3,53300	1,020	2,260		8,482	0,000%
							ERRO MEDIO	0,085%

Os parâmetros c e z foram variados de maneira a reduzir o erro de cálculo, buscando uma maior precisão entre as duas curvas.

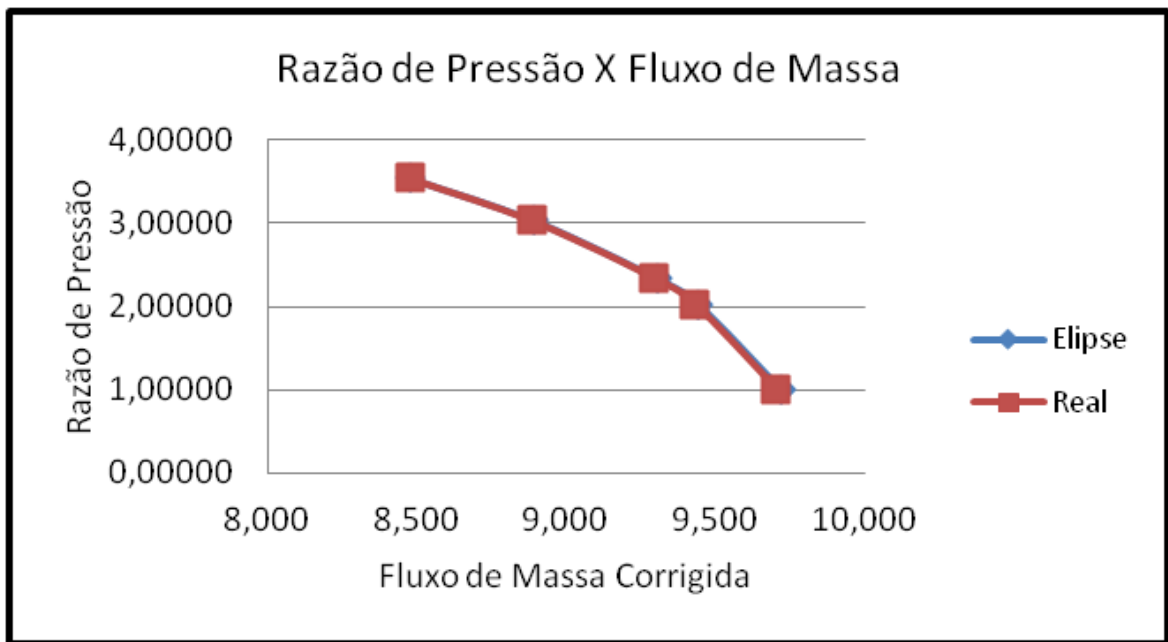


Figura 10- Curvas real e estimada pela elipse

A variação entre as curvas foi muito pequena, o que mostra uma precisão alta na estimativa da curva real do compressor.

Os cálculos foram realizados para todas as demais rotações e o gráfico completo se encontra no Anexo A.

3.2- Razão de pressão versus Eficiência

Uma outra curva importante do mapa do compressor é a curva constituída pela razão de pressão e a eficiência.

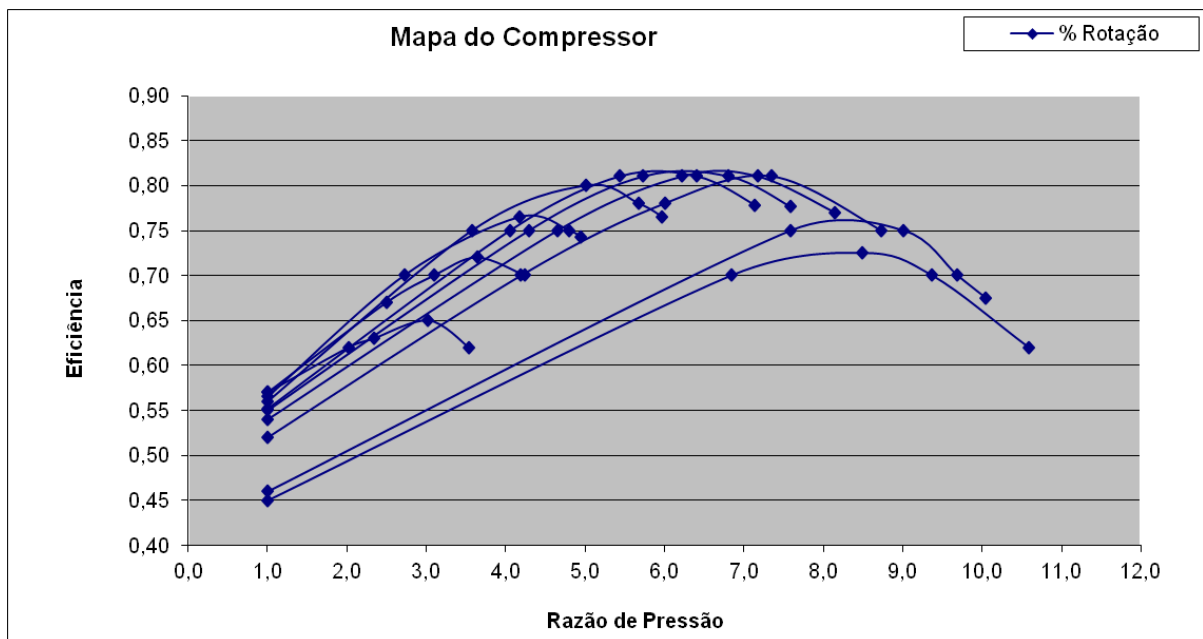


Figura 11 - Curvas de Razão de pressão por Eficiência

Para facilitar a leitura deste tipo de curva é necessário a compreensão de algumas manipulações algébricas e trigonométricas que serão explicadas ao longo da solução.

Ao observar uma única rotação percebe-se que rotacionando o eixo XY de um ângulo a curva passa a ser parecida com uma elipse conforme a figura 12.

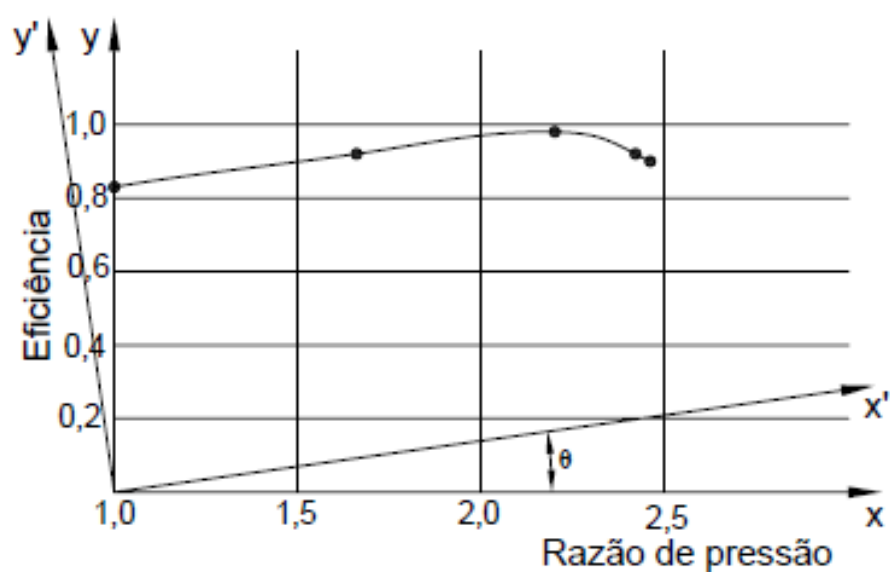


Figura 12 - Eixo rotacionado

O ângulo de rotação será a inclinação da reta formada pelos dois primeiros pontos com o eixo principal horizontal. Os demais pontos também devem ser rotacionados e assim será criada uma elipse virtual que deverá ser rotacionada de volta para o eixo real.

É possível transportar os pontos reais segundo a figura 13.

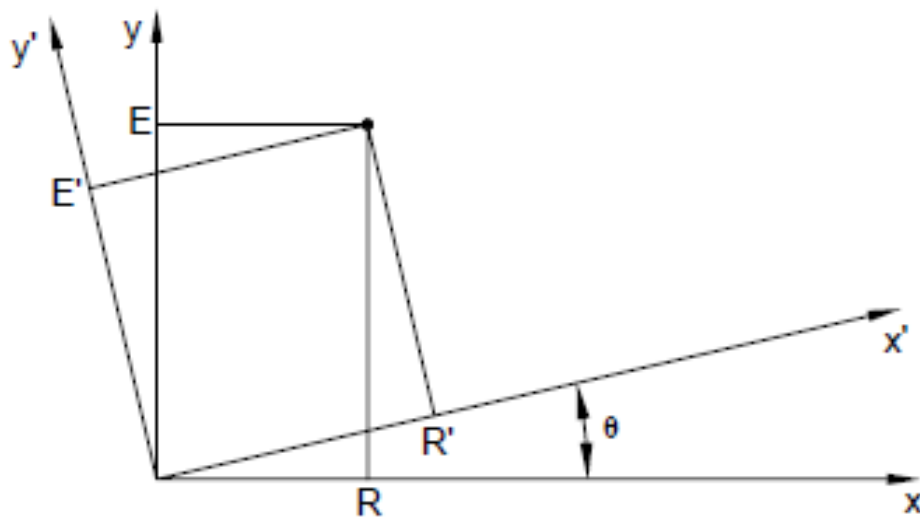


Figura 13 - Rotacionando os pontos

\$R\$ é a razão de pressão real;

\$E\$ é a eficiência real;

\$R'\$ é a razão de pressão virtual;

\$E'\$ é a eficiência virtual.

Fazendo uma manipulação trigonométrica tem-se os valores de \$E'\$ e \$R'\$.

$$E' = \frac{E - R \tan(\theta)}{\cos(\theta) - \sin(\theta) \tan(\theta)} \quad (2.4)$$

$$R' = \frac{R - E' \sin(\theta)}{\cos(\theta)} \quad (2.5)$$

A partir da rotação pode-se calcular a elipse que se assemelha a esta curva. Na figura 14 tem-se a curva real do compressor na rotação de 0.6 e a rotacionada da mesma.

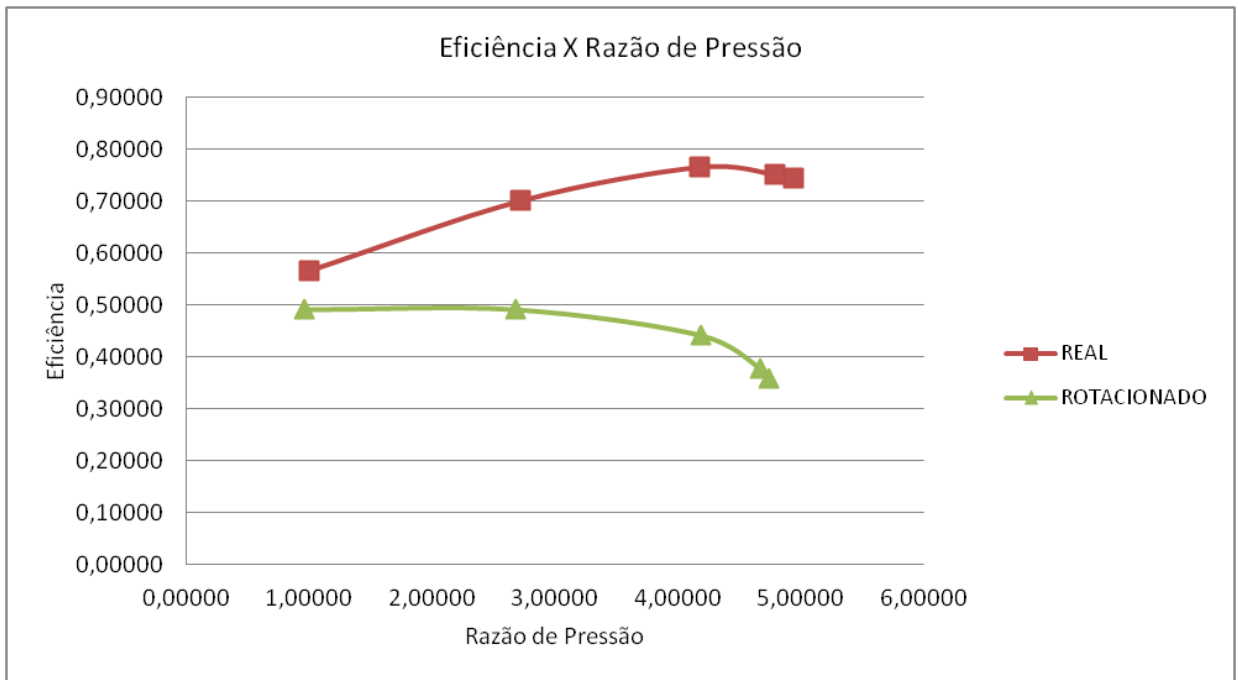


Figura 14 - Curva real e rotacionada

Dessa maneira traça-se a elipse para a curva real rotacionada. Para usar a equação 2.1 os parâmetros a e b devem ser iguais ao maior valor da razão de pressão e ao maior valor de eficiência, respectivamente.

Depois de traçada a elipse é preciso retornar ao eixo principal de maneira que a eficiência encontrada no eixo rotacionado não é a real. As equações para retornar ao eixo principal se encontram a seguir.

$$R = R' \cos(\theta) - E' \sin(\theta) \quad 2.6$$

$$E = R' \sin(\theta) + E' \cos(\theta)$$

2.7

A figura 15 mostra as curvas real e rotacionada e as respectivas elipses para uma rotação de 0,6.

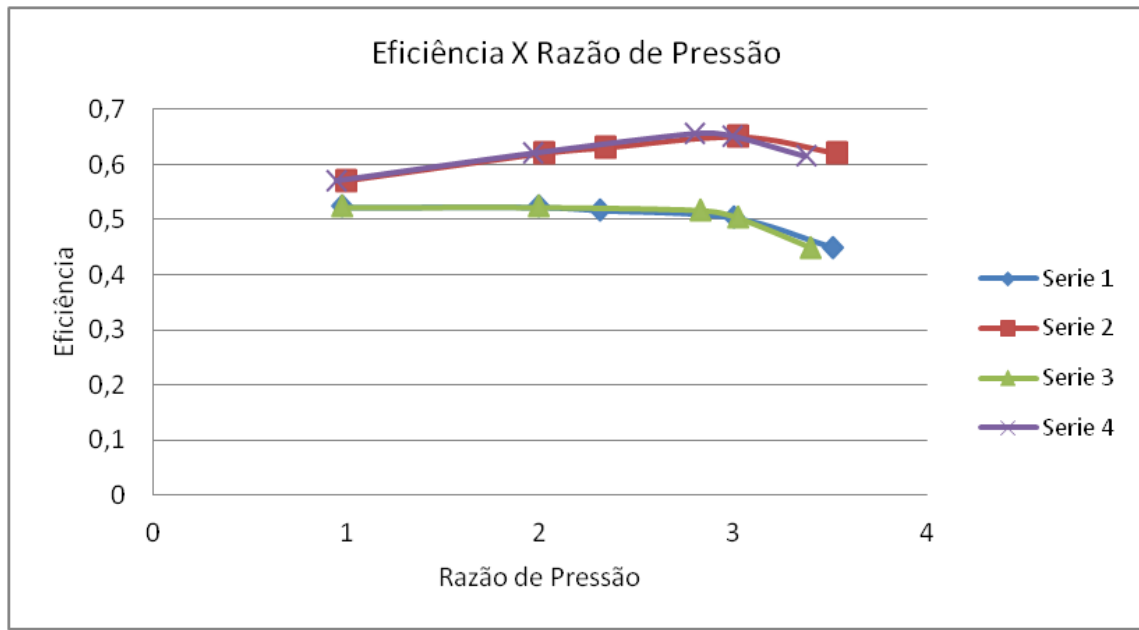


Figura 15 - Curvas real, Rotacionada e Elipses

Os cálculos e os demais gráficos se encontram no Anexo B.

Com as elipses é possível acessar os dados do compressor facilmente, pois apenas uma equação (equação da elipse) pode ser utilizada para tal objetivo.

3.3- Solução para qualquer rotação

Pelo mapa dos compressor tem-se algumas rotações fixas, portanto quando se tem uma rotação que não está na curva real é possível traçar esta curva interpolando os valores da elipse.

Os parâmetros a, c, z, x, y podem ser determinados pela interpolação dos valores enquanto que o parâmetro b pela fórmula apresentada na equação 2.2.

Portanto para determinar os parâmetros da elipse as seguintes equações são utilizadas:

$$a = a_m + \frac{(R-R_m)(a_M-a_m)}{(R_M-R_m)} \quad 2.8$$

R é a rotação desejada. O subscrito M refere-se a rotação logo acima da desejada e o subscrito m logo abaixo da desejada. O valor de a é o parâmetro na rotação desejada.

Esta equação se estende para os demais parâmetros.

$$c = c_m + \frac{(R-R_m)(c_M-c_m)}{(R_M-R_m)} \quad 2.9$$

$$z = z_m + \frac{(R-R_m)(z_M-z_m)}{(R_M-R_m)} \quad 2.10$$

$$x = x_m + \frac{(R-R_m)(x_M-x_m)}{(R_M-R_m)} \quad 2.11$$

$$y = y_m + \frac{(R-R_m)(y_M-y_m)}{(R_M-R_m)} \quad 2.12$$

Assim, para exemplificar a solução, foi montado o procedimento para 4 rotações entre 0,7 e 0,8. Assim, as curvas simuladas serão de rotações iguais a 0.72, 0.74, 0.76 e 0.78. A figura 16 demonstra o resultado do procedimento.

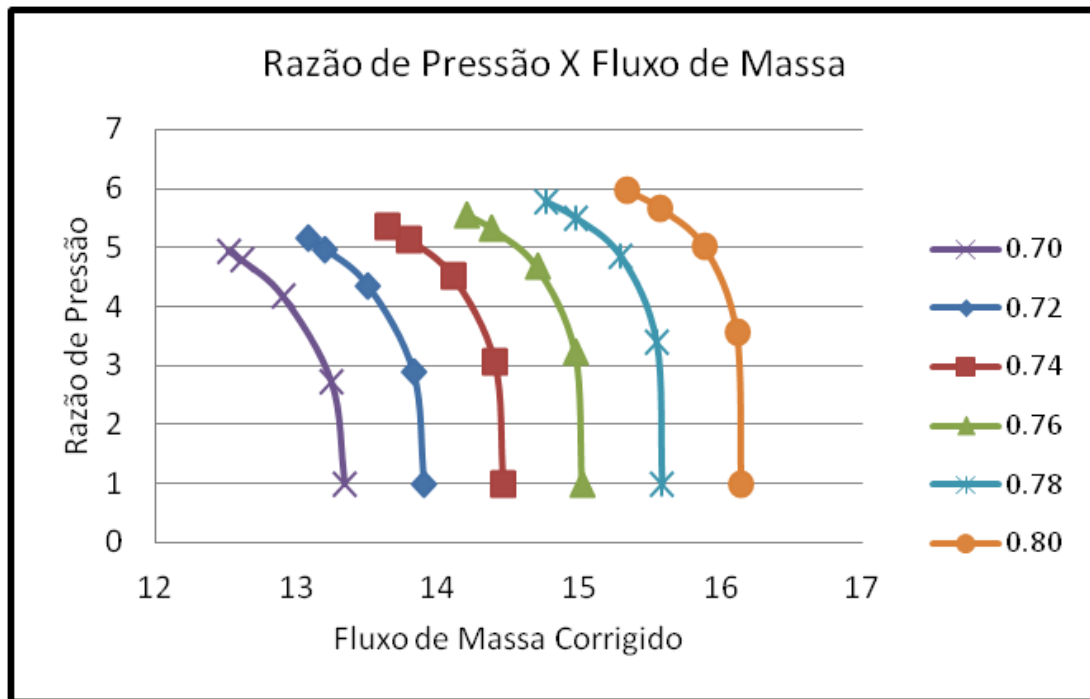


Figura 16 - Interpolação entre as rotações

Para o gráfico de eficiência pela razão de pressão, o procedimento da interpolação foi o mesmo.

5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este projeto teve como principal objetivo demonstrar que é possível simplificar os mapas de desempenho genéricos para curvas já conhecidas e que possam ser facilmente manipuladas, o que é o caso da elipse.

Ficou bem demonstrado que as discrepâncias entre as curvas (curvas reais do mapa e das elipses) foram mínimos o que garante uma confiabilidade muito grande ao método das equações elípticas utilizado.

Uma vez que identificado dois dos quatro parâmetros do compressor (provavelmente um dos identificados será a rotação), verifica-se na equação elíptica referente a rotação do compressor as demais características, podendo assim verificar a necessidade de manutenção e por consequência a paralisação da máquina, o que pode ter um alto custo dependendo da situação em que o equipamento está sendo utilizado.

Portanto o método desenvolvido mostra ser rápido e eficiente no momento de uma busca dos parâmetros que compõe o mapa de desempenho genérico do compressor.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, H. M. (2006), Desenvolvimento de um Modelo Matemático para Avaliação de Desempenho de Turbinas a Gás de um Eixo, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá.

COHEN, H., ROGERS, G. F. C., SARAVANAMUTTOO, H., I., H. (1996), Gas Turbine Theory, Fourth.

ERBES M., GAY R., GATE/CYCLE predictions of the *off*-design performance of combined-cycle power plants, Presented at the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, 10-15 December, San Francisco, CA, 1989.

7- ANEXOS

Anexo A

O anexo A mostra os gráficos de Razão de Pressão por Fluxo de Massa do mapa de desempenho do compressor. Além disso, mostra as tabelas utilizadas para o cálculo das elipses também presentes no gráfico.

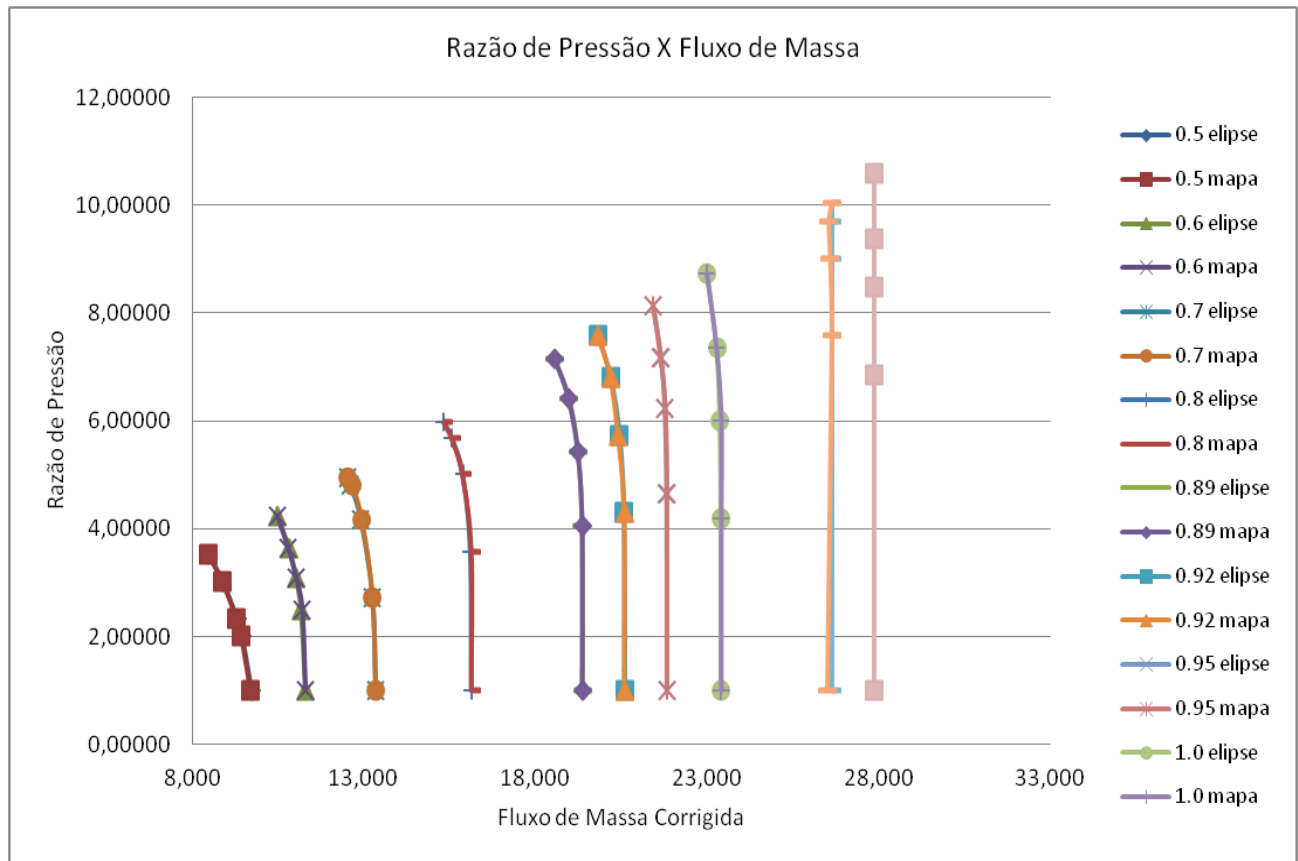


Figura 17 - Curvas reais (mapa) e as elipses traçadas (elipses) para cada rotação

Tabela 2 - Cálculo dos parâmetros para traçar as elipses

PCN	a	x	y	c	z	b	X	ERRO
0,50000	9,70688	8,48218	1,00000	1,020	2,260		9,723	0,163%
0,50000	9,70688	8,48218	2,01800	1,020	2,260		9,446	0,118%
0,50000	9,70688	8,48218	2,33500	1,020	2,260		9,306	0,080%
0,50000	9,70688	8,48218	3,02400	1,020	2,260		8,896	0,063%
0,50000	9,70688	8,48218	3,53300	1,020	2,260	6,179	8,482	0,000%
ERRO MEDIO								0,085%
0,60000	11,29445	10,47798	1,00000	1,005	3,196		11,305	0,095%
0,60000	11,29445	10,47798	2,49700	1,005	3,196		11,169	0,314%
0,60000	11,29445	10,47798	3,09600	1,005	3,196		11,022	0,004%
0,60000	11,29445	10,47798	3,63500	1,005	3,196		10,817	0,199%
0,60000	11,29445	10,47798	4,23400	1,005	3,196	6,8145806	10,478	0,000%
ERRO MEDIO								0,122%
0,70000	13,33562	12,51915	1,00000	1,001	3,500		13,336	0,005%
0,70000	13,33562	12,51915	2,71900	1,001	3,500		13,245	0,000%
0,70000	13,33562	12,51915	4,17400	1,001	3,500		12,903	0,192%
0,70000	13,33562	12,51915	4,79600	1,001	3,500		12,609	0,364%
0,70000	13,33562	12,51915	4,94600	1,001	3,500	7,8411327	12,519	0,000%
ERRO MEDIO								0,112%
0,80000	16,14789	15,33142	1,00000	1,000	6,000		16,148	0,000%
0,80000	16,14789	15,33142	3,57500	1,000	6,000		16,115	0,207%
0,80000	16,14789	15,33142	5,01200	1,000	6,000		15,885	0,061%
0,80000	16,14789	15,33142	5,67100	1,000	6,000		15,570	0,073%
0,80000	16,14789	15,33142	5,97000	1,000	6,000	7,4373288	15,331	0,000%
ERRO MEDIO								0,068%
0,89000	19,36840	18,55193	1,00000	1,001	6,000		19,373	0,023%
0,89000	19,36840	18,55193	4,05400	1,001	6,000		19,348	0,105%
0,89000	19,36840	18,55193	5,43100	1,001	6,000		19,227	0,029%
0,89000	19,36840	18,55193	6,40700	1,001	6,000		18,966	0,029%
0,89000	19,36840	18,55193	7,13800	1,001	6,000	9,1250663	18,552	0,000%
ERRO MEDIO								0,037%
0,92000	20,59309	19,82199	1,00000	1,000	5,500		20,593	0,000%
0,92000	20,59309	19,82199	4,29300	1,000	5,500		20,562	0,151%
0,92000	20,59309	19,82199	5,73100	1,000	5,500		20,439	0,134%
0,92000	20,59309	19,82199	6,80800	1,000	5,500		20,185	0,001%
0,92000	20,59309	19,82199	7,58700	1,000	5,500	10,267881	19,822	0,000%
ERRO MEDIO								0,057%
0,95000	21,81779	21,40956	1,00000	1,000	6,500		21,818	0,000%
0,95000	21,81779	21,40956	4,65300	1,000	6,500		21,808	0,047%
0,95000	21,81779	21,40956	6,22200	1,000	6,500		21,749	0,105%
0,95000	21,81779	21,40956	7,16800	1,000	6,500		21,644	0,036%
0,95000	21,81779	21,40956	8,13800	1,000	6,500	11,342658	21,410	0,000%
ERRO MEDIO								0,038%
1,00000	23,40537	22,99713	1,00000	1,000	6,500		23,405	0,000%
1,00000	23,40537	22,99713	4,19200	1,000	6,500		23,402	0,014%
1,00000	23,40537	22,99713	6,00000	1,000	6,500		23,371	0,146%
1,00000	23,40537	22,99713	7,34700	1,000	6,500		23,276	0,029%
1,00000	23,40537	22,99713	8,72500	1,000	6,500	12,286368	22,997	0,000%
ERRO MEDIO								0,038%
1,10000	26,48980	26,62587	1,00000	1,150	27,000		26,627	0,519%
1,10000	26,48980	26,62587	7,58700	1,150	27,000		26,627	0,005%
1,10000	26,48980	26,62587	9,00000	1,150	27,000		26,627	0,176%
1,10000	26,48980	26,62587	9,68300	1,150	27,000		26,627	0,345%
1,10000	26,48980	26,62587	10,04200	1,150	27,000	12,737176	26,626	0,000%
ERRO MEDIO								0,209%
1,15000	27,85057	27,85057	1,00000	1,000	1,000		27,851	0,000%
1,15000	27,85057	27,85057	6,83800	1,000	1,000		27,851	0,000%
1,15000	27,85057	27,85057	8,48500	1,000	1,000		27,851	0,000%
1,15000	27,85057	27,85057	9,36500	1,000	1,000		27,851	0,000%
1,15000	27,85057	27,85057	10,58100	1,000	1,000	#DIV/0!	27,851	0,000%
ERRO MEDIO								0,000%

Anexo B

O Anexo B mostra os gráficos de Eficiência por Razão de Pressão das diversas rotações com as elipses traçadas. Foi feito também um gráfico para cada rotação de maneira que facilite a observação. Como no gráfico de Razão de pressão por fluxo de massa a visualização é muito clara não se fez necessário traçar um gráfico para cada rotação.

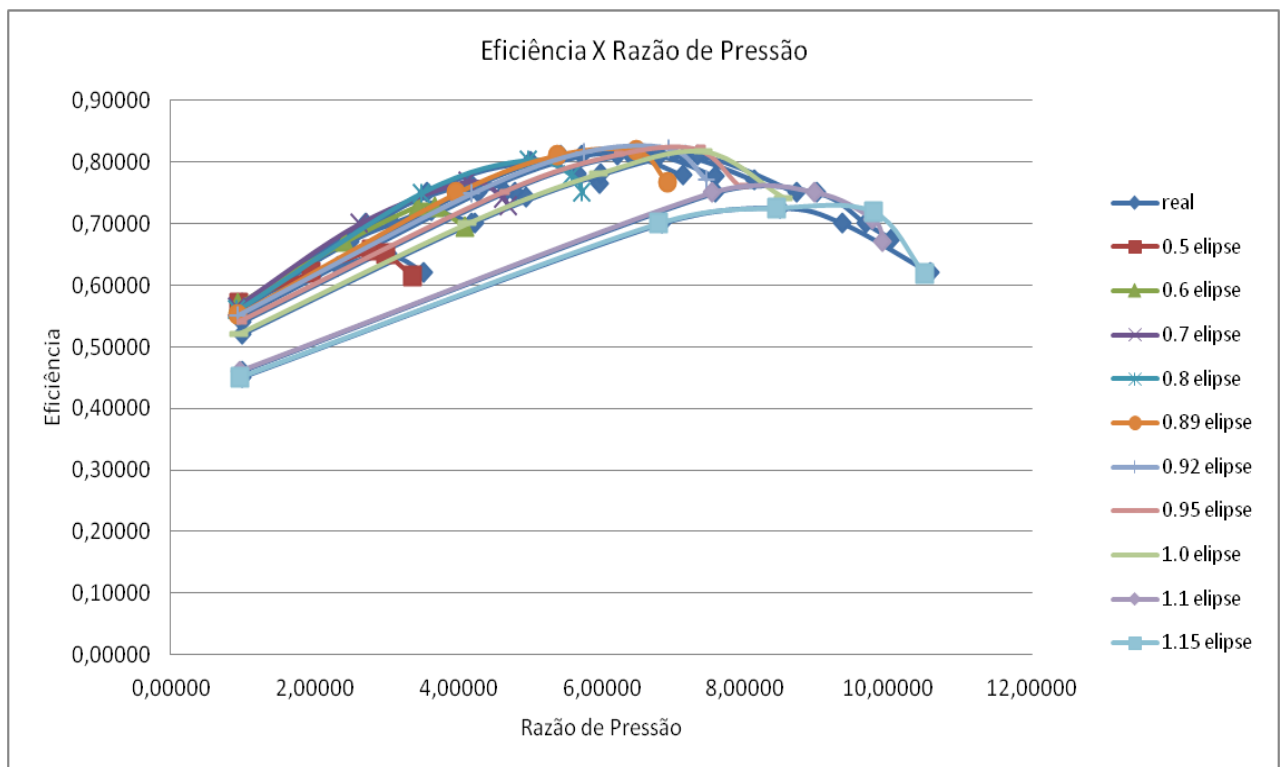


Figura 18 - Mapa Real e Elipses do gráfico Eficiência X Razão de Pressão

Os gráficos referentes a cada rotação apresenta a legenda em Série 1, Série 2, Série 3 e Série 4, essas curvas são as curvas da Real Rotacionada, Real, Elipse Rotacionada e Elipse Real, respectivamente.

Tabela 3 - Tabela para Rotação de 0.5

0.5													
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b		X	ERRO	R volta	E volta
2,8118749	0,0491	0,974324	0,522773	3,53300	0,57000	1,250	5,350			0,974	2,568%	0,947505	0,569941
		1,992324	0,522773	3,53300	0,62000	1,250	5,350			1,992	1,272%	1,964279	0,619881
		2,309598	0,517183	3,53300	0,63000	1,250	5,350			2,831	21,255%	2,802535	0,655456
		2,99928	0,503292	3,53300	0,65000	1,250	5,350			3,022	0,051%	2,994124	0,650958
		3,510992	0,448093	3,53300	0,62000	1,250	5,350	0,522773		3,398	3,826%	3,371753	0,61424
ERRO MEDIO										5,795%			

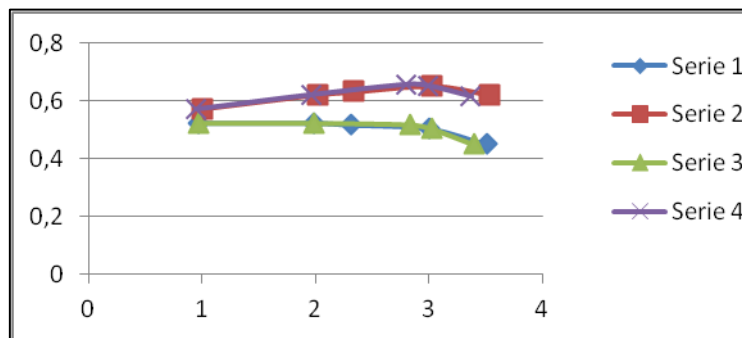


Figura 19 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 0.5

Tabela 4 - Tabela para Rotação de 0.6

0,6												
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b	X	ERRO	R volta	E volta
3,8216956	0,0667	0,96616	0,506582	4,23400	0,57000	1,250	5,350		0,966	3,384%	0,930247	0,569851
		2,46316	0,506582	4,23400	0,67000	1,250	5,350		2,463	1,355%	2,423918	0,669629
		3,062834	0,496501	4,23400	0,70000	1,250	5,350		3,483	12,507%	3,442391	0,72756
		3,60291	0,480388	4,23400	0,72000	1,250	5,350		3,716	2,219%	3,675395	0,726976
		4,205946	0,419971	4,23400	0,70000	1,250	5,350	0,506582	4,137	2,293%	4,099704	0,694769
ERRO MEDIO										4,352%		

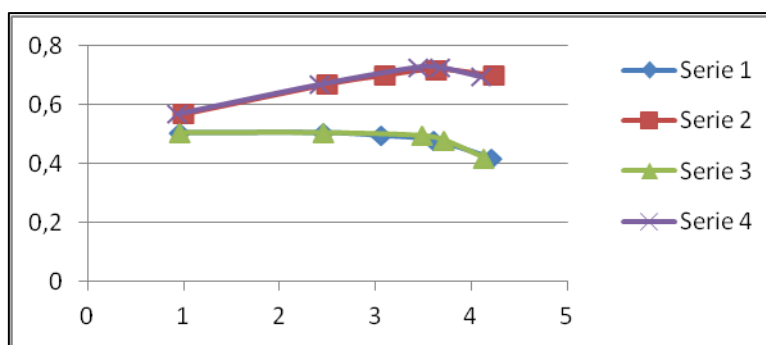


Figura 20 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 0.6

Tabela 5 - Tabela para Rotação de 0.7

0,7													
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b		X	ERRO	R volta	E volta
4,4904519	0,0784	0,96144	0,490992	4,94600	0,56500	1,000	5,150			0,961	3,856%	0,920048	0,564759
		2,68044	0,490992	4,94600	0,70000	1,000	5,150			2,680	1,418%	2,633771	0,699345
		4,139346	0,441267	4,94600	0,76500	1,000	5,150			4,185	0,264%	4,137634	0,76757
		4,766406	0,376824	4,94600	0,75000	1,000	5,150			4,670	2,625%	4,626274	0,741305
		4,917895	0,35787	4,94600	0,74300	1,000	5,150	0,490992		4,741	4,152%	4,698087	0,727931
ERRO MEDIO										2,463%			

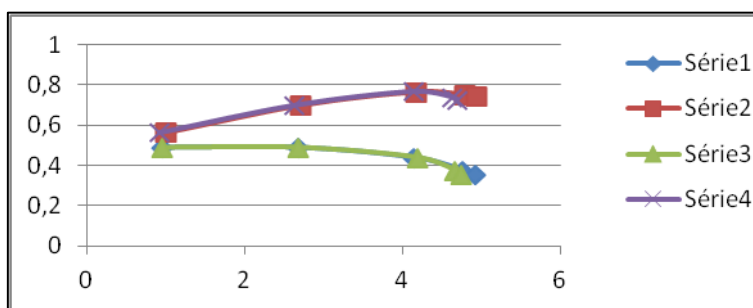


Figura 21 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 0.7

Tabela 6 - Tabela para Rotação de 0.8

0,8														
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b	X	ERRO	R volta	E volta		
	4,2200023	0,0737	0,96383	0,490204	5,97000	0,56000	1,000	4,750		0,964	3,617%	0,925144	0,5598	
				3,53883	0,490204	5,97000	0,75000	1,000	4,750		3,539	1,012%	3,493163	0,749285
				4,979998	0,433713	5,97000	0,80000	1,000	4,750		5,025	0,255%	4,979236	0,802292
			5,644103	0,364525	5,97000	0,78000	1,000	4,750		5,627	0,771%	5,58517	0,777625	
		5,94586	0,327158	5,97000	0,76500	1,000	4,750	0,490204	5,774	3,280%	5,734471	0,751174		
										ERRO MEDIO	1,787%			

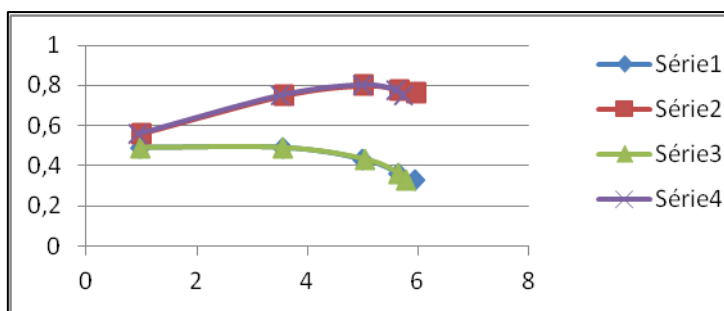


Figura 22 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 0.8

Tabela 7 - Tabela para Rotação de 0.89

0,89												
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b	X	ERRO	R volta	E volta
3,7094661	0,0647	0,968216	0,49025	7,13800	0,55200	1,000	4,900		0,968	3,178%	0,934469	0,551864
		4,022216	0,49025	7,13800	0,75000	1,000	4,900		4,022	0,784%	3,982071	0,749449
		5,401126	0,46079	7,13800	0,81000	1,000	4,900		5,430	0,012%	5,389158	0,811153
		6,381254	0,397113	7,13800	0,81000	1,000	4,900		6,525	1,835%	6,485233	0,818403
		7,117434	0,317217	7,13800	0,77800	1,000	4,900	0,49025	6,957	2,541%	6,921561	0,766629
									ERRO MEDIO	1,670%		

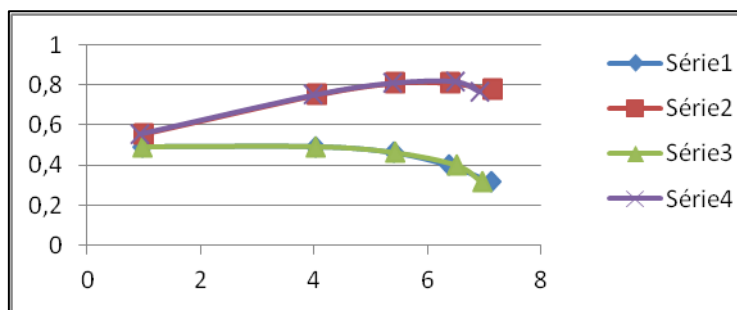


Figura 23 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 0.89

Tabela 8 - Tabela para Rotação de 0.92

0,92												
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b	X	ERRO	R volta	E volta
3,4755837	0,0607	0,97012	0,491981	7,58700	0,55000	1,090	4,450		0,970	2,988%	0,93851	0,549888
		4,26312	0,491981	7,58700	0,75000	1,090	4,450		4,229	1,495%	4,191201	0,74744
		5,702789	0,464493	7,58700	0,81000	1,090	4,450		5,804	1,268%	5,764832	0,815475
		6,783784	0,398718	7,58700	0,81000	1,090	4,450		6,983	2,571%	6,946041	0,82132
		7,56775	0,316954	7,58700	0,77600	1,090	4,450	0,491981	7,494	1,230%	7,460703	0,770663
ERRO MEDIO										1,910%		

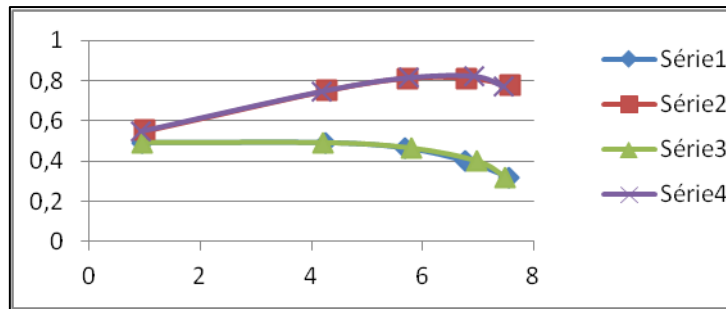


Figura 24 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 0.92

Tabela 9 - Tabela para Rotação de 0.95

0,95														
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b		X	ERRO		R volta	E volta
3,2901411	0,0574	0,972124	0,484912	8,13800	0,54000	1,000	4,900			0,972	2,788%		0,942691	0,539905
		4,625124	0,484912	8,13800	0,75000	1,000	4,900			4,625	0,599%		4,58967	0,749559
		6,195868	0,454565	8,13800	0,81000	1,000	4,900			6,236	0,232%		6,200088	0,81174
		7,14501	0,399912	8,13800	0,81000	1,000	4,900			7,360	2,675%		7,324653	0,821644
		8,120543	0,303673	8,13800	0,77000	1,000	4,900	0,484912		7,963	2,148%		7,932639	0,760198
		ERRO MEDIO										1,688%		

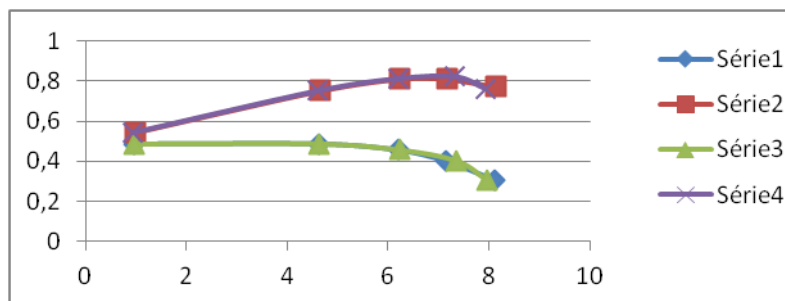


Figura 25 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 0.95

Tabela 10 - Tabela para Rotação de 1.0

1												
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b	X	ERRO	R volta	E volta
3,2275468	0,0563	0,973732	0,465827	8,72500	0,52000	1,000	4,400		0,974	2,627%	0,94596	0,519911
		4,165732	0,465827	8,72500	0,70000	1,000	4,400		4,166	0,627%	4,132897	0,699625
		5,974976	0,443767	8,72500	0,78000	1,000	4,400		5,998	0,037%	5,963297	0,780748
		7,32458	0,397588	8,72500	0,81000	1,000	4,400		7,460	1,534%	7,42551	0,816952
		8,710382	0,259223	8,72500	0,75000	1,000	4,400	0,465827	8,570	1,777%	8,541781	0,741314
ERRO MEDIO										1,320%		

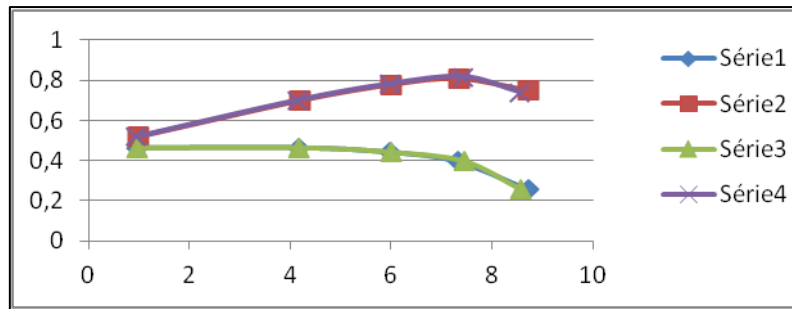


Figura 26 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 1.0

Tabela 11 - Tabela para Rotação de 1.1

1,1												
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b	X	ERRO	R volta	E volta
2,5208825	0,0440	0,981633	0,417185	10,04200	0,46000	1,000	5,150		0,982	1,837%	0,962334	0,459957
		7,568633	0,417185	10,04200	0,75000	1,000	5,150		7,569	0,242%	7,542959	0,749677
		8,98438	0,354795	10,04200	0,75000	1,000	5,150		8,991	0,103%	8,966392	0,749894
		9,670915	0,274492	10,04200	0,70000	1,000	5,150		9,805	1,258%	9,783289	0,705478
		10,03172	0,233568	10,04200	0,67500	1,000	5,150	0,417185	9,942	1,000%	9,921724	0,670609
ERRO MEDIO										0,888%		

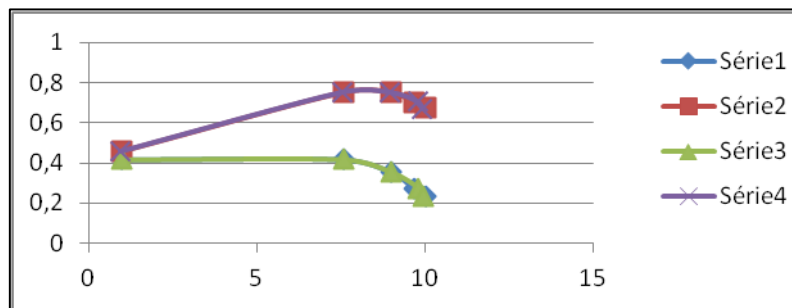


Figura 27 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 1.1

Tabela 12 - Tabela para Rotação de 1.15

1,15												
	theta (RAD)	teste R'	teste E'	a	y	c	z	b	X	ERRO	R volta	E volta
2,4520724	0,0428	0,982515	0,408299	10,58100	0,45000	1,000	4,200		0,983	1,748%	0,964147	0,449961
		6,820515	0,408299	10,58100	0,70000	1,000	4,200		6,821	0,256%	6,796802	0,699732
		8,469471	0,362644	10,58100	0,72500	1,000	4,200		8,468	0,205%	8,444351	0,724588
		9,352162	0,299787	10,58100	0,70000	1,000	4,200		9,807	4,718%	9,785007	0,719084
		10,57383	0,167351	10,58100	0,62000	1,000	4,200	0,408299	10,521	0,567%	10,50418	0,617324
												ERRO MEDIO

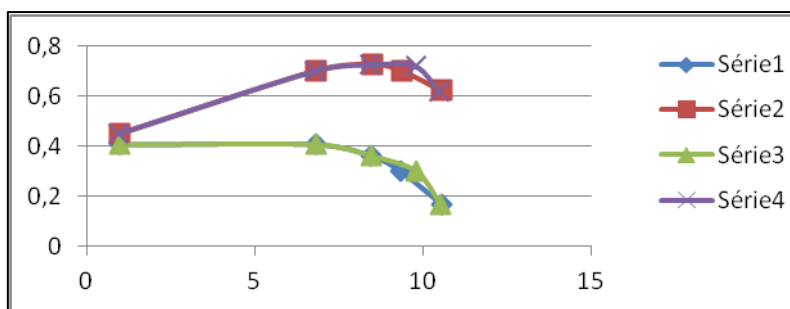


Figura 28 - Gráfico Eficiência X Razão de Pressão mostrando as Elipses (real e rotacionada) e o mapa (real e rotacionado) para rotação 1.15